

На правах рукописи

Дымов Андрей Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ РАДИОВОЛН
В УСЛОВИЯХ ГОРОДА С УЧЁТОМ РЕЛЬЕФА
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Ярославль – 2010

Работа выполнена на кафедре радиофизики
ГООУ ВПО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук,
доцент Тимофеев Владимир Авенирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Казаков Леонид Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Яковлев Сергей Леонидович

Ведущая организация – Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 14 мая 2010 г. в 15.00 на заседании диссертационного
совета Д 212.002.05 при Ярославском государственном университете
им. П.Г. Демидова по адресу: 150000, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ярославского
государственного университета им. П.Г. Демидова по адресу:
150000, г. Ярославль, ул. Полушкина роща, д. 1.

Автореферат разослан «___» апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глызин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С начала 70-х годов прошлого столетия внимание исследователей и инженеров во многих странах было обращено к проблеме распространения ультракоротких волн (частотный диапазон от 30 МГц до 3000 ГГц) в городских условиях. Это связано с интенсивным развитием систем радиосвязи различного назначения – от телевидения до систем связи с подвижными объектами и радиотелефонии, играющих в жизни городов огромную роль.

Впервые проблема распространения ультракоротких волн (УКВ) в городах возникла еще в 30-е годы в связи с развитием радиовещания. После первых работ, выполненных в основном в метровом диапазоне, интерес к проблеме постепенно падал из-за сложности распространения излучения и трудностей получения достоверных количественных оценок. По характеристике Б. А. Введенского, опубликовавшего в 1938 г. первый аналитический обзор по распространению метровых радиоволн в городах, для ультракоротких волн «городские районы представляют собой местности, пересеченность которых доведена до крайних пределов»¹. Дальнейшим толчком к развитию исследований по распространению радиоволн в городе послужило развитие и внедрение средств подвижной связи. Обширные затенения, создаваемые строениями, отражения, дифракция и рассеяние излучения придают процессу распространения многолучевой характер и формируют сложную интерференционную структуру поля с глубокими и резкими пространственными замираниями. Это создает значительные трудности для прогноза условий работы радиосредств.

В связи с активным внедрением новых перспективных радиосистем различного назначения проблема адекватного моделирования распространения радиоволн в городской среде является достаточно актуальной задачей. Большинство радиоэлектронных средств, существующих на данный момент, работают в условиях города и играют важную роль в его нормальном функционировании. Сейчас сложно найти крупный город, в котором не было бы развернуто и не продолжало бы внедряться большое количество разнообразных систем радиодоступа (IEEE 802.11(WiFi), IEEE 802.16 (WiMax)), средств подвижной связи (D-AMPS, GSM, IS-95(CDMA), SmarTrunk, TETRA, EDACS, 3G/UMTS), системы радиовещания и телевидения (DVB-S, DVB-T, DVB-M, T-DAB) и т.д. Все они функционируют либо планируются для применения в диапазоне ультракоротких волн. Современный крупный город с точки зрения распространения радиоволн представляет собой сложную неоднородную электродинамическую структуру, простирающуюся иногда на десятки километров. Неоднородности

¹ Введенский, Б.А. Распространение ультракоротких радиоволн / Б.А. Введенский. – М.: Наука, 1973.

рельефа подстилающей поверхности также оказывают существенное влияние на формирование поля в точке приема.

Информация о распределении поля в условиях городской застройки необходима для обеспечения качественного функционирования радиоэлектронных средств, для решения вопросов электромагнитной совместимости, оценки электромагнитной обстановки (требующихся для правильного расположения средств радиосвязи и определения их взаимного влияния). Кроме того, из-за большого количества передающих устройств, существуют проблемы экологии, рассмотрение которых на практике также не возможно без данных о пространственном распределении поля.

Таким образом, существует актуальная научная проблема моделирования распространения ультракоротких радиоволн в городской среде с учетом рельефа подстилающей поверхности.

Цель работы

Основной целью данной диссертационной работы являлась разработка математической модели и создание комплекса программ для анализа распространения ультракоротких волн в городской среде с учетом рельефа подстилающей поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов моделирования распространения ультракоротких радиоволн в городе.
2. Разработать математическую модель для расчета пространственного распределения электромагнитного поля в условиях города в зависимости от характеристик застройки и рельефа подстилающей поверхности.
3. Обосновать корректность использованного численного метода и оценить его погрешности.
4. На основе разработанной математической модели создать пакет программ для численного анализа пространственного распределения поля в городских условиях.
5. Проанализировать влияние параметров среды распространения на ослабление сигнала.
6. Провести экспериментальные исследования и выполнить сравнительный анализ полученных данных с результатами численного моделирования.

Методы исследования

В работе использованы методы теории дифракции, методы программирования, математический аппарат: методы математического анализа и численные методы. Сравнительный анализ теоретических и

экспериментальных результатов выполнен на основе проведенных натурных измерений.

Научная новизна результатов

На основе метода Гюйгенса-Кирхгофа разработана математическая модель расчета пространственного распределения поля в городской среде в зависимости от характеристик застройки и рельефа подстилающей поверхности. Выполнены обоснование корректности использованного численного метода и оценка его погрешности. Проведен подробный анализ влияния параметров застройки и рельефа местности на ослабление поля в городских условиях. Выполнено сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования на основе разработанной модели, а также с другими наиболее широко применяемыми моделями различных авторов. Предложена упрощенная методика расчета, позволяющая оперативно получить информацию об ослаблении напряженности поля в городской среде.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель расчета поля на основе метода Гюйгенса-Кирхгофа в городской среде с учетом влияния рельефа подстилающей поверхности.
2. Метод вычисления и оценка его погрешности.
3. Результаты анализа влияния параметров среды распространения на ослабление сигнала.
4. Результаты сравнительного анализа наиболее применяемых на практике моделей с полученными экспериментальными данными и теоретическими расчетами на основе предложенной модели.

Теоретическая и практическая ценность работы

Основные результаты работы могут быть использованы для анализа пространственного распределения поля в условиях города при решении задач по оценке электромагнитной обстановки региона, электромагнитной совместимости и экологии. Предложенная в диссертации модель, а также полученные на её основе аппроксимационные формулы, могут найти применение в системах проектирования и анализа радиосетей. Разработанный программный продукт может быть использован в качестве иллюстративного материала в учебном процессе, а также в качестве исследовательского инструмента при изучении особенностей распространения УКВ в условиях города, учитывая особенности рельефа подстилающей поверхности и параметры городской застройки.

Ознакомиться с программой «Multiple screen diffraction» можно на сайте <http://msdiffn.narod2.ru/>.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

1. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004». Москва, 2004;
2. 6-я Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 2004;
3. XI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2005;
4. VI областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных вузов «Ярославский край. Наше общество в третьем тысячелетии». Ярославль, 2005;
5. XII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2006;
6. XIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2007;
7. IX Международная научно-практическая конференция «Проблема техники и технологии телекоммуникаций». Казань, 2008.

Кроме того, результаты диссертации были изложены на ряде заседаний кафедры радиофизики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, а также на семинаре «Нелинейная динамика» кафедры математического моделирования Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в работах [1-16], в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, 8 статей и 8 тезисов докладов конференций, в том числе 5 международных. Из указанных ниже публикаций по теме диссертации работы [1-2, 9-12, 14-15] выполнены совместно с научным руководителем В.А. Тимофеевым, которому принадлежит постановка рассмотренных задач. В работах [1, 4-9] Р.Ю. Козлов принимал участие в создании варианта аппроксимационной формулы и проведении экспериментальных исследований. Работа [3] выполнена совместно с П.Н. Нестеровым, которому принадлежит методика доказательства некоторых утверждений при анализе корректности использованного численного метода в рассмотренной задаче. Работы [13, 16] выполнены без соавторов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 97 наименований. Общий объем составляет 138 страниц, в том числе 36 иллюстраций, 6 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и ее практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, дан критический анализ работ в области моделирования распространения радиоволн в условиях города.

В **первой главе** рассмотрены основные особенности распространения радиоволн в условиях города, проведен обзор методов анализа взаимодействия радиоволн с городской застройкой и существующих математических моделей. Выполнено сопоставление существующих методов моделирования.

Показано, что большое количество работ, посвященных вопросу распространения электромагнитных волн в городе, основываются на экспериментальных данных – это так называемые эмпирические методы. Примером таких методов могут послужить формулы Окамуры-Хата и методы, базирующиеся на их результатах, модель Уолфиш-Икегами, формулы Бардина, Рубина, Трифонова. Они просты в применении, но в большинстве случаев не учитывают ряд существенных параметров, влияющих на формирование поля. Кроме того, их применение, как и всех эмпирических моделей, ограничено тем обстоятельством, что они были разработаны на основе измерений в конкретных районах и на определенных частотах, поэтому не охватывают всего многообразия условий, встречающихся на практике.

В отличие от эмпирических, аналитические методы основываются на анализе основных физических эффектов, возникающих при взаимодействии излучения с городской средой. Условно их можно разделить на лучевые, волновые и статистические методы. Лучевые основываются на использовании геоинформации о городской среде и определении возможных траекторий распространения радиоволн с учетом взаимодействия излучения с элементами застройки. Такие методы трудоемки и очень требовательны к вычислительным ресурсам. Как показывает практика, они удовлетворительно описывают процесс распространения на расстояниях до 1 км и меньше, но при увеличении протяженности трасс погрешность моделирования существенно возрастает. Поэтому с точки зрения расчета зон покрытия, зон уверенной радиосвязи и т.п. эти модели в настоящее время находят ограниченное применение.

В противовес этим методам, статистические модели, базирующиеся на аналитическом подходе, дают приемлемые результаты только на достаточно больших расстояниях и не применимы для коротких трасс. В них используется статистическое усреднение для нахождения поля в городской

застройке, которое учитывает случайный характер распределения неоднородностей (застройки) и других параметров, приводящих к вероятностному характеру распределения поля.

Волновые модели, например, метод Воглера, метод Гюйгенса-Кирхгофа, основаны на приближениях физической оптики для анализа дифракции на отдельных строениях, предполагая последние в виде упрощенных препятствий (полуплоскость). Эти модели могут быть использованы на расстояниях до 5 км между передатчиком и приемником, однако требуют значительных вычислительных ресурсов.

В целом, как показал анализ существующих методов, влияние такого важного для распространения радиоволн параметра, как рельеф подстилающей поверхности, в подавляющем большинстве моделей не рассматривается.

Исходя из выполненного анализа существующих моделей распространения ультракоротких радиоволн в городской среде, был сделан вывод о необходимости разработки математической модели для расчета пространственного распределения поля, в которой учитывается специфика взаимодействия электромагнитного поля с городской застройкой и рельефом подстилающей поверхности.

Для моделирования был использован метод Гюйгенса-Кирхгофа (метод физической оптики). В нем явно можно учесть рельеф трассы. Однако, при его применении возникают трудности, связанные с практическим применением. Метод нуждается в детальном анализе и разработке математической модели для практического применения (численный метод, оценка погрешностей вычисления и т.д.). В отличие от метода трассировки лучей, от данной модели можно ожидать, что она менее требовательна к вычислительным ресурсам, а также к информации о деталях среды распространения: взаимном расположении и угловом повороте зданий, менее значимо влияние смещения местоположения отдельного строения. Это могло бы обеспечивать меньшее влияние на результаты вычислений от неточности геоинформационных данных.

Во второй главе предложена математическая модель распространения радиоволн в городских условиях с учетом рельефа подстилающей поверхности. В ее основу положен метод Гюйгенса-Кирхгофа решения дифракционных задач, который состоит в использовании интегральной теоремы Кирхгофа-Гельмгольца. Данная теорема пригодна для последовательного вычисления пространственного распределения поля $E(x, y, z)$, которое может быть представлено следующим образом:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{\lambda i} \iint_{\Sigma} E(x_1, \tau, \eta) \frac{d}{r} \frac{e^{i2\pi r / \lambda}}{r} d\tau d\eta, \quad (1)$$

где $r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - \tau)^2 + (z - \eta)^2}$, $d = x - x_1$, $E(x_1, \tau, \eta)$ – поле,

определяемое видом источника излучения, λ – длина волны излучения, i – мнимая единица. Геометрия задачи приведена на рис. 1. Источник находится в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) . Положение точки в плоскости экрана Σ , на котором происходит дифракция, описывается координатами (τ, η) в плоскости $x = x_1$. Прием осуществляется в точке (y, z) в плоскости $x > x_1$.

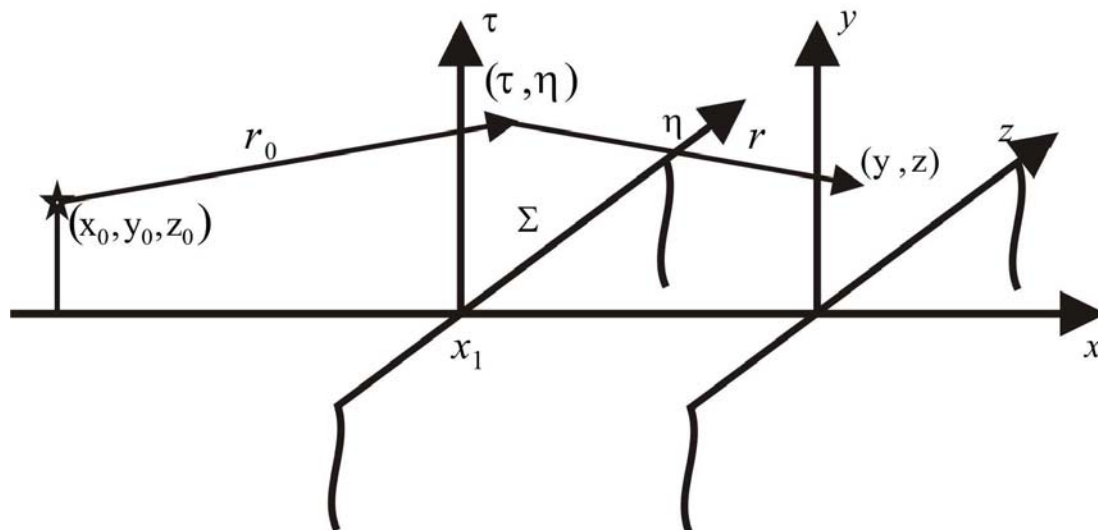


Рис. 1. Система координат

Далее в диссертации дано физическое обоснование возможности использования метода Гюйгенса-Кирхгофа для моделирования распространения УКВ радиоволн в городских условиях.

Показано, что поле в точке приема формируется в результате последовательной дифракции на зданиях, стоящих на радиотрассе, при этом сами здания моделируются поглощающими полуплоскостями $(-\infty < z < \infty)$. При этом высоты полуплоскостей относительно линии визирования определяются совокупностью высоты рельефа местности и городской застройки для каждого конкретного профиля трассы. Таким образом, вследствие последовательной дифракции на полуплоскостях, поле над $(n + 1)$ -м экраном в точке y для волны единичной амплитуды можно представить в следующем виде:

$$E_{n+1}(y) = \frac{d_n e^{i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\lambda}} \int_{b_n}^{\infty} E_n(\tau) \frac{e^{-ikr_n}}{r_n \sqrt{r_n}} d\tau, \quad (2)$$

где b_n – высота n -го экрана, расположенного на расстоянии x_n от источника,

а $r_n = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y - \tau)^2}$, $y \in [b_{n+1}, \infty)$, $d_n = x_{n+1} - x_n$ (рис. 2).

Последовательное применение интеграла (2) позволяет вычислять поле в произвольной точке.

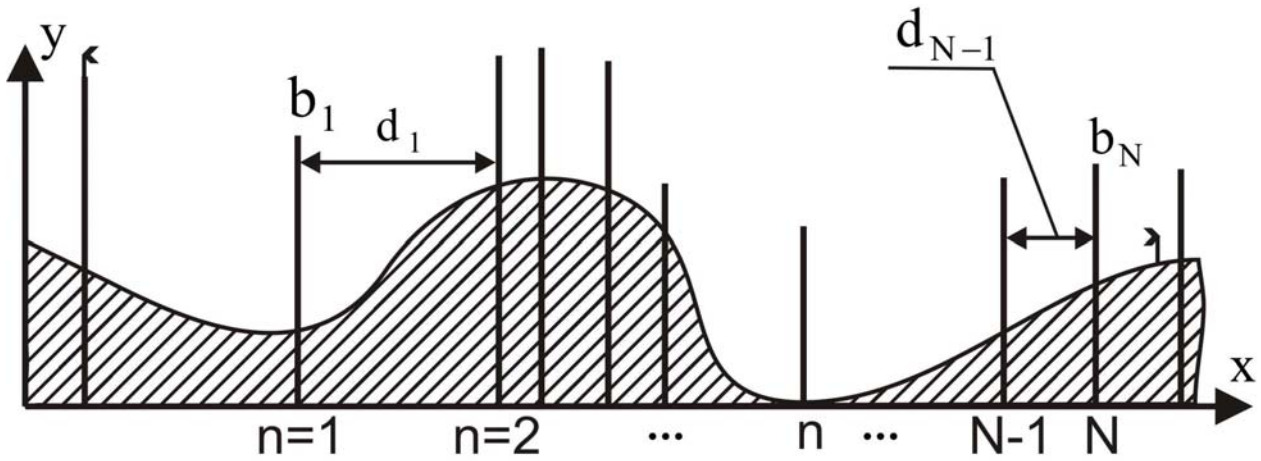


Рис. 2. Геометрия задачи

Показано, что вычисление интеграла (2) имеет определенную математическую специфику, связанную с наличием в подынтегральном выражении быстроосциллирующего сомножителя. При использовании стандартных методов интегрирования быстроосциллирующих функций возникают определенные вычислительные трудности. Поэтому при моделировании интеграл разбивался на дискретные интервалы h , на которых амплитуда и фаза подынтегрального выражения аппроксимировались линейными функциями. Это позволило выполнить интегрирование в замкнутой форме, превращая интегрирование в суммирование.

В работе была доказана абсолютная сходимость получающейся суммы. Выполнена оценка погрешностей, связанных с аппроксимацией подынтегральных функций и с вычислением частичных сумм, вместо бесконечных, а также накоплением погрешности при увеличении вычислительных итераций. Полученные результаты сформулированы в виде теоремы.

Теорема 1. Пусть значения функции $E_{n+1}(y)$ ($n=1, \dots, N$), заданной равенством, приближаются значениями величины S_{J-1} , вычисленными по формуле

$$S_J = \frac{h}{2} \sum_{j=0}^J (f(\tau_j, y_p) + f(\tau_{j+1}, y_p)) \exp\{ig(\tau_j, y_p)\} + \\ + i \frac{h}{2} \sum_{j=0}^J (g(\tau_{j+1}, y_p) - g(\tau_j, y_p)) f(\tau_j, y_p) \exp\{ig(\tau_j, y_p)\},$$

$$\text{где } f(\tau_j, y_p) = \frac{d_n}{\sqrt{\lambda}} \exp\{i \frac{\pi}{4}\} \frac{E_n(\tau_j)}{r_n^{3/2}(\tau_j, y_p)}, \quad g(\tau_j, y_p) = \frac{2\pi}{\lambda} r_n(\tau_j, y_p), \quad \tau_j = b_n + jh,$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, J, \quad y_p = b_{n+1} + ph, \quad p = 0, 1, 2, \dots, J; \quad r_n = \sqrt{d_n^2 + (y - \tau_j)^2},$$

$d_n = x_{n+1} - x_n$. Тогда для всех $n=1, \dots, N$

$$E_{n+1}(y) = S_{J-1} + O\left(\frac{1}{Jh}\right) + O(h^2), \quad h \rightarrow 0, \quad Jh \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Таким образом, оценка погрешности вычисления поля при последовательной дифракции выполняется при помощи выражения (3). Расчетная формула для $E_{n+1}(y)$, которая была использована при численных оценках, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} E_{n+1}(y_p) = & \frac{h}{2} \sum_{j=0}^J \left(\frac{d_n}{r_n(\tau_j, y_p) \sqrt{\lambda r_n(\tau_j, y_p)}} E_n(\tau_j) + \right. \\ & \left. + \frac{d_n}{r_n(\tau_{j+1}, y_p) \sqrt{\lambda r_n(\tau_{j+1}, y_p)}} E_n(\tau_{j+1}) \right) \exp\{i 2\pi r_n(\tau_j, y_p)/\lambda\} + \\ & + i \frac{h}{2} \sum_{j=0}^J (2\pi r_n(\tau_{j+1}, y_p)/\lambda - 2\pi r_n(\tau_j, y_p)/\lambda) \frac{d_n}{r_n(\tau_j, y_p) \sqrt{\lambda r_n(\tau_j, y_p)}} \times \\ & \times E_n(\tau_{j+1}) \exp\{i 2\pi r_n(\tau_j, y_p)/\lambda\}. \end{aligned} \quad (4)$$

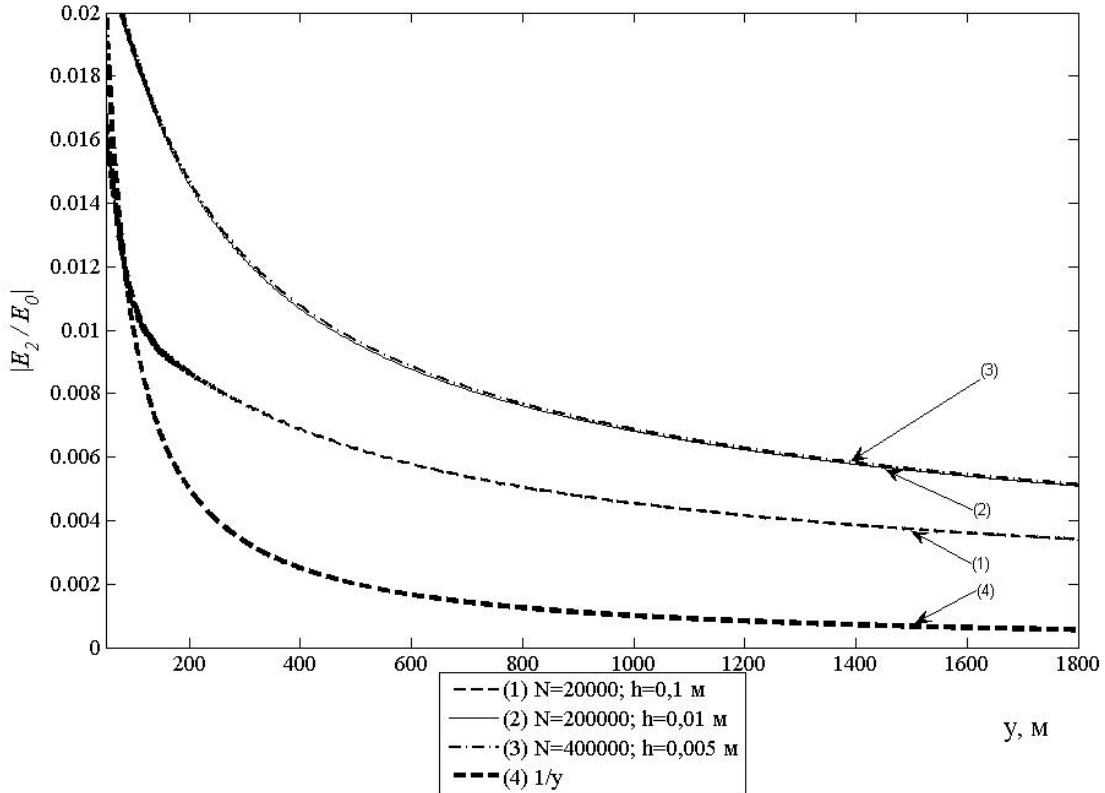


Рис. 3. Поведение нормированного модуля напряженности поля над экраном $n=2$

На рисунке 3 в качестве примера представлен график $|E_2(y)/E_0|$ для случая $\lambda = 0,33$ м при различных значениях J и h , где E_0 – исходная падающая волна. Параметры выбраны следующим образом, что величина Jh остается постоянной, а $h \rightarrow 0$. Соответственно, величина h/λ принимает следующие значения 0,3; 0,03; 0,003.

Во всех случаях выбирались одинаковые значения для параметров b_n (нижний предел интегрирования), при этом предполагалось, как и ранее, что на первый экран падает волна единичной амплитуды. Для возможности сравнения асимптотического поведения функций на рисунках построен график функции y^{-1} .

Как показали выполненные численные эксперименты, даже при $J \sim 200000$, вычисления занимают достаточно много времени. Поэтому при практических вычислениях необходимо корректно ограничить количество членов в бесконечной сумме расчетной формулы. В спектральном анализе часто применяется метод взвешивания (метод окна) для корректного усечения бесконечной суммы. Такой подход и был использован в работе. В качестве весовой функции было выбрано окно Кайзера-Бесселя, что позволило существенно сократить время вычислений.

Практические расчеты показали, что использование функции окна Кайзера-Бесселя позволило ограничить величину $J < 20000$ и, выбирая отношение шага суммирования к длине волны излучения $h/\lambda \leq 0,3$, сохранить точность вычислений 0,1% для решаемой задачи.

Исходя из физических соображений, рассмотренная модель была дополнена возможностью учета отражения радиоволн от земной поверхности. В этом случае выражение для поля может быть определено суммой прямой волны и отраженной от подстилающей поверхности:

$$E_{n+1}(y) = E_{n+1_{fwd}}(y) + E_{n+1_{ref}}(y). \quad (5)$$

В этом, более общем случае, расчетная формула принимает следующий вид (с применением весовой функции):

$$\begin{aligned} E_{n+1}(y_{*p}) = & \frac{h_*}{2} \sum_{j=0}^J \left(\frac{d_{*n}}{r_{*n}(\tau_j, y_{*p}) \sqrt{r_{*n}(\tau_j, y_{*p})}} E_n(\tau_j) + \right. \\ & \left. + \frac{d_{*n}}{r_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p}) \sqrt{r_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p})}} E_n(\tau_{j+1}) \right) \cdot \exp\{i2\pi r_{*n}(\tau_j, y_{*p})\} + \\ & + i \frac{h_*}{2} \sum_{j=0}^J (2\pi r_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p}) - 2\pi r_{*n}(\tau_j, y_{*p})) \frac{d_{*n}}{r_{*n}(\tau_j, y_{*p}) \sqrt{r_{*n}(\tau_j, y_{*p})}} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times E_n(\tau_{j+1}) \exp\{i2\pi\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})\} + \\
& + \dot{\Gamma}(\theta_2) \frac{h_*}{2} \sum_{j=0}^J \left(\frac{d_{*n}}{\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p}) \sqrt{\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})}} E_n(\tau_j) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{d_{*n}}{\hat{r}_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p}) \sqrt{\hat{r}_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p})}} E_n(\tau_{j+1}) \right) \exp\{i2\pi\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})\} + \\
& + i\dot{\Gamma}(\theta_2) \frac{h_*}{2} \sum_{j=0}^J (2\pi\hat{r}_{*n}(\tau_{j+1}, y_{*p}) - 2\pi\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})) \frac{d_{*n}}{\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p}) \sqrt{\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})}} \times \\
& \quad \times E_n(\tau_{j+1}) \exp\{i2\pi\hat{r}_{*n}(\tau_j, y_{*p})\}, \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{где } E_n(\tau_{*j}) &= \begin{cases} E_n(\tau_{*j}), & \text{если } 0 \leq j \leq \left\lfloor \frac{\sqrt{8L_*}}{h_*} \right\rfloor, \\ E_n(\tau_{*j}) \cdot w(\tau_{*j} - \frac{\sqrt{8L_*}}{h_*}), & \text{если } \left\lfloor \frac{\sqrt{8L_*}}{h_*} \right\rfloor < j \leq J \end{cases}, \\
h_* &= \frac{h}{\lambda}, \quad d_{*n} = x_{*n+1} - x_{*n}, \quad x_{*n} = \frac{x_n}{\lambda}, \quad y_{*p} = \frac{b_{n+1}}{\lambda} + \frac{y_p}{\lambda} = b_{*n+1} + p \cdot h_*, \\
\tau_{*j} &= \frac{b_n + \tau_j}{\lambda} = b_{*n} + h_* \cdot j, \quad L_* = L/\lambda, \quad \theta_2 = \arccos((y_{*p} + \tau_{*j})/\hat{r}_{*n}(\tau_{*j}, y_{*p})), \\
J &= \left\lfloor \frac{\sqrt{8L_*}}{h_*} + \frac{15,0\sqrt{d_{*n}}}{h_*} \right\rfloor, \quad r_{*n}(\tau_j, y_{*p}) = \sqrt{(d_{*n})^2 + (h_* p + b_{*n+1} - h_* j - b_{*n})^2}, \\
\hat{r}_{*n}(\tau_{*j}, y_{*p}) &= \sqrt{(d_{*n})^2 + (h_* p + b_{*n+1} + h_* j + b_{*n})^2}, \quad w(\xi) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\xi/\Omega)^2})}{I_0(\beta)}.
\end{aligned}$$

Здесь L нормированная максимальная протяженность трассы, комплексный коэффициент отражения $\dot{\Gamma}(\theta_2)$ зависит от конкретных условий задачи, $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, размер окна $\Omega = 15,0\sqrt{\lambda \cdot d_n}$ устанавливает ширину главного максимума. Параметр β отвечает за крутизну спада весовой функции и определяется требованиями к затуханию в полосе подавления. Ширина окна определяется в величинах зон Френеля.

Предложенная формула (6) позволяет рассчитать напряженность поля вследствие многократной дифракции с учетом однократно отраженного сигнала от земной поверхности. На её основе была разработана компьютерная модель для анализа пространственного распределения поля в реальной городской среде.

Третья глава посвящена анализу результатов моделирования распространения ультракоротких волн в городе с учетом рельефа подстилающей поверхности.

Разработанная модель позволяет получить пространственное распределение поля при произвольных параметрах городской застройки и подстилающей поверхности, однако, первоначально был выполнен расчет для ряда модельных задач. Для частного случая (плоская поверхность) проведено сравнение с решением соответствующей задачи при помощи функций Боерсма¹, которое показало хорошее согласие результатов.

Было исследовано влияние частоты сигнала (рис. 4), расположения антенны и параметров застройки, характера рельефа подстилающей поверхности (рис. 5, рис. 6) на потери. Последние характеризуют затухание, происходящее между передатчиком и приемником при распространении электромагнитной волны, и определяются как: $L = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{tr}}{P_r}\right)$ (дБ), где P_{tr} – излучаемая мощность, а P_r – принимаемая мощность.

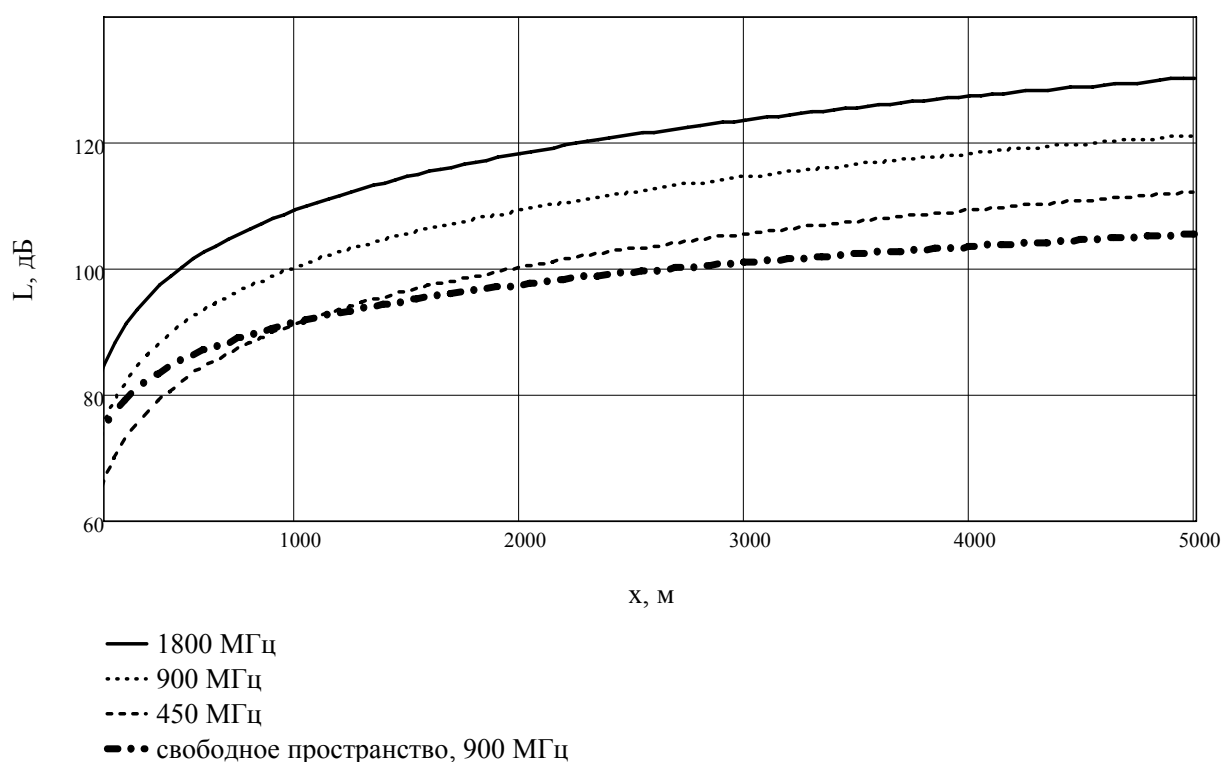


Рис. 4. Зависимость потерь L от расстояния при различных частотах

Анализ показал, что потери увеличиваются с ростом частоты сигнала. Аналогичная ситуация наблюдается и при уменьшении расстояний между зданиями. Увеличение высоты строений, как и уменьшение уровня подвеса передающей антенны над подстилающей поверхностью также ведет к увеличению потерь.

¹ Xia, H.H. Diffraction of Cylindrical and Plane Waves by an Array of Absorbing Half-Screens / H.H. Xia, H.L. Bertoni // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1992. – V. 40. – № 2. – P. 170-177.

Часто на практике неровности рельефа аппроксимируют клиновидным препятствием с закругленной вершиной либо цилиндрическим холмом радиусом Rh . Для обоих случаев при увеличении кривизны вершины (увеличении крутизны холма) наблюдается возрастание потерь (рис. 5), а при больших расстояниях (где влияние холма не значительно) все графики стремятся к одному значению.

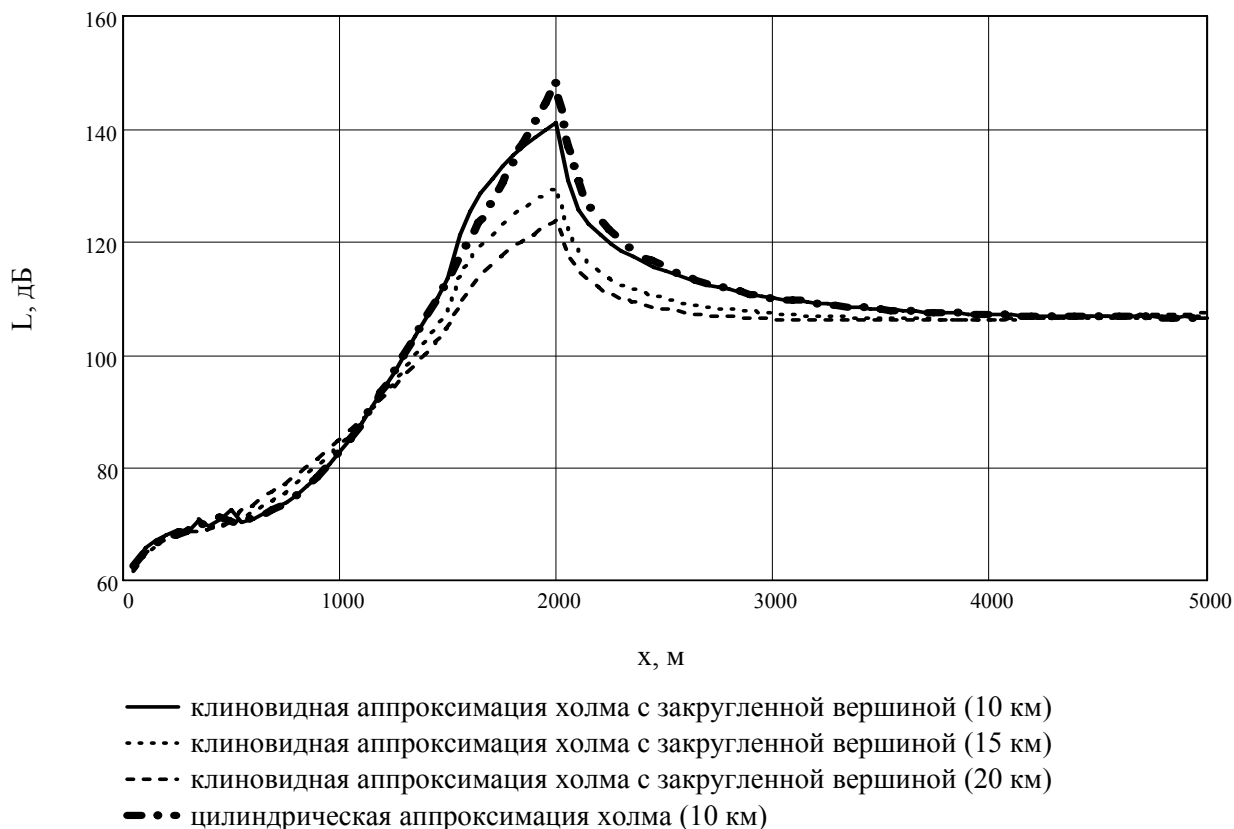


Рис. 5. Зависимость потерь от расстояния при различных радиусах вершины клиновидного холма для частоты 900 МГц

Следует отметить тот факт, что в случае цилиндрической аппроксимации сразу за холмом значение потерь больше, чем в случае клиновидной аппроксимации. Объясняется это тем, что у подножия холма в этом случае крутизна касательной больше (точки пересечения с плоской поверхностью одинаковы в обоих случаях).

Был выполнен анализ влияния более сложных препятствий. На рис. 6 представлены зависимости для отдельного цилиндрического препятствия и для двух цилиндрических препятствий с радиусами Rh_1 и Rh_2 . На расстояниях, равных протяженности первого холма, графики совпадают в обоих случаях. Далее характер кривых меняется. Для зданий, находящихся на втором препятствии, уменьшается зона тени за счет высоты второго холма. Это приводит к возрастанию сигнала. Однако далее при увеличении расстояния потери возрастают. При прочих равных условиях уровень сигнала

за двумя холмами меньше, чем за отдельным изолированным холмом, поскольку второй холм является дополнительным препятствием.

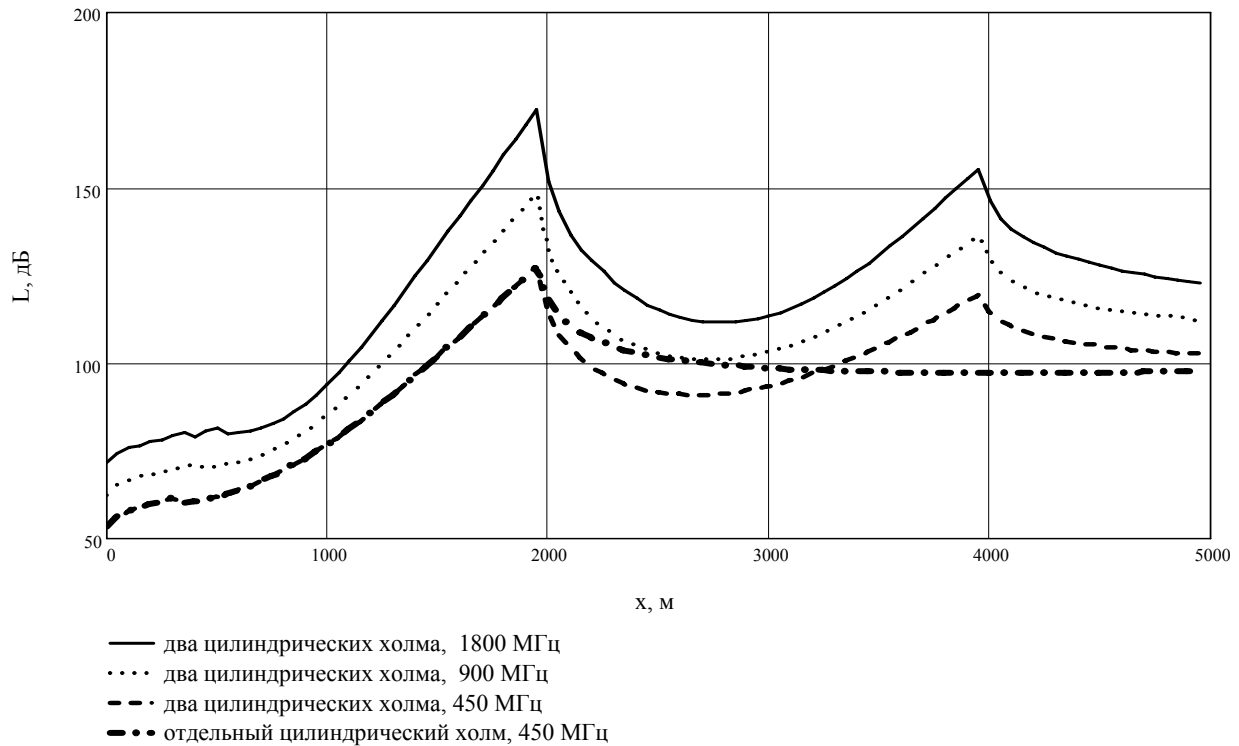


Рис. 6. Зависимость потерь L от расстояния при различных длинах волн для препятствий вида изолированный цилиндрический холм и два цилиндрических холма ($b=17$ м, $H=67$ м, $d=50$ м, $Rh_1=10$ км, $Rh_2=25$ км)

Анализ результатов показал, что вклад отраженной волны при всех исследованных параметрах задачи не превышал 1 дБ.

На основе полученных данных была предложена аппроксимационная формула для оперативного расчета ослабления в городских условиях, представляющая собой выражения для вычисления дифракционного ослабления на неровностях рельефа трассы и аддитивной добавки, описывающей городскую среду. В использованных терминах выражение для потерь имеет вид:

$$L = L_{dif} + L_{town} + L_f, \quad (7)$$

где L_{dif} – потери (дБ) вследствие дифракции на неровностях рельефа, L_{town} – потери (дБ), обусловленные взаимодействием с городской застройкой, L_f – потери в свободном пространстве. Причем потери на неровностях рельефа L_{dif} могут быть рассчитаны различными традиционно применяемыми методами.

Аппроксимационная формула для добавки L_{town} была получена в терминах потерь на основе данных, рассчитанных при помощи метода

Гюйгенса-Кирхгофа. Слагаемое L_{town} в безразмерных переменных (относительно длины волны) в случае расположения точки приема за холмом при $x_* \geq X_{hill*}$ (где X_{hill} – ширина подножия холма) имеет следующий вид:

$$L_{town}(Rh_*, H_* - b_*, d_*, x_*) = 141,939 \cdot \log(x_*) + (0,0048 \cdot (H_* - b_*) - 0,86) \cdot \sqrt{x_*} + 373,379 + (0,00922 \cdot d_* - 1,022 \cdot \sqrt{d_*}) + (6,763 \log(Rh_*) + 0,098 \sqrt{Rh_*}). \quad (7)$$

В случае расположения точки приема на теневом склоне холма при $X_{hill*}/2 < x_* < X_{hill*}$ она может быть представлена как:

$$L_{town}(Rh_*, H_* - b_*, d_*, x_*) = (0,0048 \cdot (H_* - b_*) - 0,86) \cdot \sqrt{x_*} + (9,22 \cdot 10^{-3} d_* - 1,022 \sqrt{d_*}) + (29,218 \log(Rh_*) - 0,055 \sqrt{Rh_*}) - 45,923, \quad (8)$$

где $H_* = H/\lambda$ – нормированная высота передатчика, $Rh_* = Rh/\lambda$ – нормированный радиус препятствия, $b_* = b/\lambda$, $d_* = d/\lambda$, $x_* = x/\lambda$.

Сравнительный анализ с точными расчетами показал, что максимальное расхождение составляет 4 дБ при следующих параметрах задачи: разность высот подъема передающей антенны и высоты зданий – от 0 до 600λ ; расстояние между зданиями – от 80λ до 1500λ ; максимальная протяженность трассы – 32000λ , при этом $0,01 < \lambda < 1$ м. Таким образом, можно рекомендовать предложенную формулу в качестве инженерной для расчета напряженности поля при проектировании систем связи в условиях городской застройки с учетом рельефа местности.

В четвертой главе приведены результаты натурных исследований напряжённости поля для систем сотовой связи стандарта GSM 900 и GSM 1800, функционирующих на территории г. Архангельска и г. Ярославля, соответственно.

Измерения были выполнены в соответствии с рекомендациями Международного Союза Электросвязи¹ для определения пространственного распределения напряжённости поля. Экспериментальные исследования уровня принимаемого сигнала осуществлялись на основе метода «группового среднего»².

Был выполнен сравнительный анализ для предложенного метода, а также для следующих наиболее часто используемых на практике моделей распространения: модель COST-231-Хата, усовершенствованная модель Хата, применяемая в SEAMCAT, модель Хата-Дэвидсона, модель Уолфиш–Икегами. Сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования проводились для каждой модели на основе статистических

¹ Recommendation ITU-R SM.378.

² Справочник по радиоконтролю. – Женева: МСЭ, 2002.

расчетов среднего расхождения ε и среднеквадратичного отклонения σ между измеренными и рассчитанными значениями потерь в точке расположения приемной антенны.

Было выделено несколько случаев (видов трасс), когда распространение радиоволн происходит:

- преимущественно параллельно улицам ($0^0 - 35^0$);
- под углом $35^0 - 55^0$ к направлению улиц;
- преимущественно перпендикулярно улицам ($55^0 - 90^0$).

В результате статистической обработки установлено, что наилучшее согласие в плане средней величины отклонения между измеренными и рассчитанными значениями наблюдалось для модели Гюйгенса-Кирхгофа, как для квазиплоской, так и для более сложной подстилающей поверхности. Наилучшее совпадение в плане среднеквадратического отклонения имело место также для предложенной модели и составляло 5,7 дБ. В то время как значения среднеквадратического отклонения для всех остальных моделей примерно одинаковы и находились в диапазоне $7,08 \leq \sigma \leq 7,53$ дБ. Детальный сравнительный анализ показал, что метод Гюйгенса-Кирхгофа и аппроксимационная формула наиболее близки к результатам натурных измерений в случае перпендикулярного расположения улиц относительно направления распространения сигнала. Данная ситуация наиболее соответствовала используемому в модели представлению городской застройки.

Выявлено, что разработанная модель на основе метода Гюйгенса-Кирхгофа, в отличие от метода трассировки лучей, не столь требовательна к вычислительным ресурсам, а также к информации о деталях среды распространения.

В **заключении** кратко приводятся основные результаты и выводы.

В **приложении** представлены скриншоты, иллюстрирующие программный пакет «Multiple screen diffraction», а также ключевые выдержки из кода, написанного на языке C++ в среде разработки C++Builder 5.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в ведущих научных журналах, включенных в перечень ВАК:

- [1] *Дымов, А.В.* Ослабление сигнала в области тени, создаваемой рельефом местности, в городских условиях / *А.В. Дымов, Р.Ю. Козлов, В.А. Тимофеев* // Телекоммуникации. – 2006. – №9. – С. 2-6.
- [2] *Дымов, А.В.* Моделирование распространения радиоволн в городских условиях методом Гюйгенса-Кирхгофа / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Радиотехника. – 2008. – № 12. – С. 29-33.
- [3] *Дымов, А.В.* Математическое обоснование одного численного эксперимента / *А.В. Дымов, П.Н. Нестеров* // Моделирование и анализ информационных систем. – 2009. – Т. 16, №4. – С. 56 – 75.

Другие публикации:

- [4] *Дымов, А.В.* Результаты моделирования распространения радиоволн в городских условиях с учётом рельефа местности / *А.В. Дымов, Р.Ю. Козлов* // Актуальные проблемы физики: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ярославль: ЯрГУ, 2003. – Вып. 4. – С. 83-89.
- [5] *Дымов, А.В.* Анализ особенностей распространения радиоволн в городских условиях с учётом рельефа трассы / *А.В. Дымов, Р.Ю. Козлов* // Тезисы докладов 6-й Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск: КГТУ, 2004. – С. 207-208.
- [6] *Дымов, А.В.* Анализ распространения радиоволн в городских условиях методом Гюйгенса-Кирхгофа / *А.В. Дымов, Р.Ю. Козлов* // Сборник тезисов «Ломоносов 2004». Физический факультет. – М.: МГУ, 2004. – С. 246-247.
- [7] *Дымов, А.В.* Анализ напряжённости поля в зоне тени, создаваемой рельефом трассы / *А. В. Дымов, Р.Ю. Козлов* // Ярославский край. Наше общество в третьем тысячелетии: сборник материалов VI областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных вузов. – Ярославль: Ремдер, 2005. – С. 65.
- [8] *Дымов, А.В.* Инженерная модель для расчёта напряженности поля в городе в зоне тени, создаваемой рельефом / *А. В. Дымов, Р.Ю. Козлов* // Актуальные проблемы физики: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – Вып. 5. – С. 121-128.
- [9] *Дымов, А.В.* Исследование распространения радиоволн в городских условиях в зоне тени, создаваемой рельефом подстилающей поверхности / *А.В. Дымов, Р.Ю. Козлов, В.А. Тимофеев* // Труды XI международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь". – Воронеж, 2005. – Т. 3. – С. 1845-1850.
- [10] *Дымов, А.В.* Экспериментальные исследования и сравнительный анализ методов моделирования распространения радиоволн дециметрового диапазона в условиях города / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Труды XII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2006. – Т.1. – С. 575-581.
- [11] *Дымов, А.В.* Анализ методов моделирования распространения радиоволн диапазона 900 МГц в условиях города / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Физический вестник ЯрГУ им. П.Г. Демидова: сб. научн. тр. – Ярославль: ЯрГУ, 2006. – Вып. 1. – С. 157-165.
- [12] *Дымов, А.В.* Исследование распространения радиоволн в городских условиях в диапазоне 1800 МГц / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Труды

ХІІІ міжнародної науково-технічної конференції «Радиолокація, навігація, зв'язь». – Воронеж, 2007. – Т.1. – С. 611-616.

- [13] *Дымов, А.В.* Влияние кривизны фазового фронта на ослабление поля при дифракции на совокупности поглощающих экранов / *А.В. Дымов* // Актуальные проблемы физики: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – Вып. 6. – С. 94-101.
- [14] *Дымов, А.В.* Метод оперативного расчета ослабления дециметровых радиоволн в городской среде / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Труды девятой международной научно-практической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Казань, 2008. – Т.1. – С. 145-146.
- [15] *Дымов, А.В.* Аппроксимационная зависимость ослабления поля в городских условиях с учетом рельефа / *А.В. Дымов, В.А. Тимофеев* // Вестник ЯрГУ. Серия «Физика. Радиотехника. Связь». – Ярославль, 2008. – №9(1) – С. 75-78.
- [16] *Дымов, А.В.* Моделирование распределения радиоволн УКВ диапазона в условиях города с учетом рельефа подстилающей поверхности / *А.В. Дымов* // Моделирование и анализ информационных систем. – 2009. – Т. 16, №4. – С. 136.